УДК: 621.311.62

В.М. Рулевский

Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тросе системы электропитания подводного аппарата

Представлена методика определения оптимальных значений трехфазного напряжения и частоты в кабель-тросе системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для обеспечения минимальной токовой нагрузки с учетом собственной емкости кабель-троса.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, система электропитания, напряжение, частота, кабель-трос, трехфазный инвертор, реактивный ток.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127

Для выполнения различного вида работ на морском дне все чаще используют телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) с глубиной погружения до 6000 м. Основным элементом подводного аппарата является система электропитания (СЭП), которая обеспечивает надежное функционирование различной научно-исследовательской и специальной аппаратуры. Описание вариантов выполнения систем электропитания, достоинств и недостатков каждого из них достаточно подробно изложено в работах [1–11]. Анализ источников литературы показывает, что в настоящее время для обеспечения высоких удельных характеристик СЭП ТНПА целесообразно применять систему с передачей энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном токе повышенной частоты. В данных системах ТНПА и надводный корабль (судно-носитель) соединены друг с другом трехфазным кабель-тросом (линией связи), содержащим три токопроводящие жилы для передачи на подводный аппарат питающего напряжения. Формирование трехфазного напряжения осуществляется автономным инвертором, расположенным в бортовой части СЭП [12, 13].

Разработанная и предложенная методика определения оптимального напряжения и частоты позволит минимизировать токовую нагрузку на жилы кабель-троса и обеспечит требуемые массогабаритные показатели бортовой и подводной части СЭП ТНПА.

Конструктивно кабель-трос (рис. 1) изготовлен в виде двухслойной намотки в противоположных направлениях вокруг кабеля стальных проволок, выполняющих для проводников кабеля роль экранирующей оплетки. Этот экран является одновременно и броней кабель-троса, он электрически соединен с корпусом корабля и корпусом ТНПА [14].

Силовые жилы кабель-троса имеют относительно друг друга и относительно брони паразитную емкость, которая является дополнительной нагрузкой реактивного характера для инвертора и кабель-троса. В рабочем режиме вследствие обжатия кабель-троса гидростатическим давлением происходит увеличение этих паразитных емкостей.

Влияние емкостной дополнительной нагрузки на элементы инвертора (силовые ключи, выходной

трансформатор) устраняют подключением к выходу инвертора трехфазного компенсирующего устройства [15, 16]. Компенсирующее устройство позволяет защитить от емкостного тока только инвертор, но не разгружает кабель-трос.

Рис. 1. Кабель-трос типа КГ (ООО «Псковгеокабель»)

Обоснование выбора напряжения

Для определения токовой нагрузки в кабель-тросе и оптимального питающего напряжения, для примера, выполним анализ работы реального кабель-троса (таблица), имеющего паразитные емкости токопроводящих жил между собой и относительно броневой оплетки.

В таблице приведены параметры кабель-троса, рассчитанного на мощность 60 кВт, длиной 6000 м.

Параметры кабель-троса, рассчитанные на мощность 60 кВт, длиной 6000 м	
Фазное напряжение V_{ϕ}	1000 В
Линейное напряжение $V_{\text{л}}$	1740 В
Емкость фазная C_{ϕ}	0,66 мкФ
Емкость линейная $C_{\text{л}}$	0,833 мкФ
Сопротивление X_{ϕ}	191,2 Ом
Сопротивление $X_{\text{к}}$	241,3 Ом
Частота напряжения f	1 кГц

Предполагается, что параметры трехфазной системы питающих напряжений и кабель-троса являются симметричными, а нагрузка распределена равномерно по фазам. Схема СЭП ТНПА с однозвенной схемой замещения кабель-троса приведена на рис. 2.

В схему замещения кабель-троса введен дополнительный резистор R_7 , который необходим для корректной работы программы моделирования, в реальной схеме он отсутствует.

Рис. 2. Однозвенная схема замещения кабель-троса

Источники переменного напряжения $V1, V2, V3$, соединенные в «звезду», образуют трехфазный источник питания ТНПА (фазы A, B, C). Данный источник питания связан с трехфазным питающим входом ТНПА трехжильным кабель-тросом.

На схеме резисторы $R1, R2, R3$ представляют омическое сопротивление жил кабеля; конденсаторы $C1, C2, C3$ имитируют паразитные емкости жил кабель-троса между собой (линейные емкости C_L); конденсаторы $C4, C5, C6$ имитируют паразитные емкости жил кабель-троса относительно брони (фазные емкости C_Φ). Токоприемники ТНПА представлены резистивной трехфазной нагрузкой, выполненной на элементах $R4, R5, R6$, соединенных по схеме «звезда».

При исследовании схемы рассматривается случай полной симметрии трехфазного кабель-троса $C1 = C2 = C3 = C_L$ и $C4 = C5 = C6 = C_\Phi$, так как в реальной схеме кабель-трос подключен к нагрузке через согласующий трехфазный трансформатор и трехфазный неуправляемый выпрямитель. Также считается симметричным трехфазный источник питания.

На рис. 3 приведена векторная диаграмма напряжений и токов для схемы, представленной на рис. 2 [17–19]. На диаграмме стрелками показаны направления токов и напряжений, принятые за положительные, а также указаны следующие векторы: V_A, V_B, V_C – фазных напряжений; I_{An} – тока нагрузки фазы A ; I_{C1}, I_{C3}, I_{C4} – емкостных составляющих тока фазы A , протекающих через паразитные емкости $C1, C3, C4$.

На схеме замещения (см. рис. 2) конденсаторы $C1, C2, C3$ соединены по схеме «треугольник». Положительное направление тока принято по часовой стрелке.

Емкостной ток $I_{Aемк}$ фазы A равен векторной сумме трех токов, протекающих через паразитные емкости $C1, C3, C4$:

$$I_{Aемк} = I_{C1} + (-I_{C3}) + I_{C4}. \quad (1)$$

Для нахождения данных токов определим реактивные сопротивления паразитных емкостей кабель-троса $C1 \dots C6$:

$$X_{C1} = X_{C2} = X_{C3} = X_L = (-j)/\omega C_L;$$

$$X_{C4} = X_{C5} = X_{C6} = X_\Phi = (-j)/\omega C_\Phi,$$

где X_L – реактивное сопротивление линейной емкости; X_Φ – реактивное сопротивление фазной емкости; ω – угловая частота питающего напряжения.

Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов однозвенной схемы замещения кабель-троса

Ток I_{C1} протекает через емкость $C1$ под действием линейного напряжения V_{CB} , опережает его по фазе на угол 90° и определяется выражением

$$I_{C1} = \frac{V_{AB}}{X_L} = \frac{V_{AB}\omega C_L}{-j} = jV_{AB}\omega C_L. \quad (2)$$

Ток I_{C3} протекает через емкость $C3$ под действием линейного напряжения V_{CA} , опережает его по фазе на угол 90° и определяется выражением:

$$I_{C3} = \frac{V_{CA}}{X_L} = \frac{V_{CA}\omega C_L}{-j} = jV_{CA}\omega C_L. \quad (3)$$

В выражении (1) для тока $I_{Aемк}$ составляющая I_{C3} имеет знак «минус», так как ток I_{C3} имеет отрицательное направление [17].

Паразитные емкости жил кабель-троса относительно брони (емкости $C4, C5, C6$) соединены между собой через броню кабель-троса по схеме «звезда». При таком соединении одинаковых емкостей потенциал их общей точки, т.е. брони, относительно общей точки источника питания равен нулю. Поэтому заряд/разряд емкостей $C4, C5, C6$ происходит под действием соответствующего фазного напряжения: V_A, V_B или V_C . В частности, емкость $C4$ заряжается/разряжается током I_{C4} , который протекает под действием фазного напряжения V_A , опережает это напряжение на угол 90° и определяется следующим выражением:

$$I_{C4} = \frac{V_A}{X_\Phi} = \frac{V_A\omega C_\Phi}{-j} = jV_A\omega C_\Phi. \quad (4)$$

Подставив в формулу для емкостного тока $I_{Aемк}$ фазы A выражения (2)–(4), получим

$$I_{Aемк} = I_{C1} + (-I_{C3}) + I_{C4} = jV_{AB}\omega C_L - jV_{CA}\omega C_L + jV_A\omega C_\Phi. \quad (5)$$

На векторной диаграмме вектор I_{C1} является перпендикуляром к вектору V_{AB} ; вектор $-I_{C3}$ – перпендикуляром к вектору V_{CA} ; вектор I_{C4} – перпендикуляром к вектору V_A . Все эти векторы направлены в сторону опережения соответствующих векторов напряжения. Сумма векторов (5) представляет собой реактивный ток емкостного характера, протекающий по фазе A .

На векторной диаграмме векторы I_{C1} и $-I_{C3}$ расположены под углом 30° к мнимой оси j . Поэтому модуль вектора $I_{\text{емк}}$, равный его проекции на мнимую ось, можно определить следующим образом:

$$|I_{\text{емк}}| = I_{\text{емк}} = \frac{2V_\phi \sqrt{3} \cos 30}{X_\phi} + \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (6)$$

В выражении (6) учтено соотношение $V_\phi \sqrt{3} = V_\phi$, а также равенство емкостей $C1 = C3 = C_\phi$, $C4 = C_\phi$.

Для удобства построения кривых упростим выражение (6):

$$I_{\text{емк}} = \left(2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,866 \cdot \frac{X_\phi}{X_\phi} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi} = \left(2,96 \frac{C_\phi}{C_\phi} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (7)$$

Значения емкостей C_ϕ , C_ϕ в технической документации на кабель-трос не приводятся. Эти данные находятся непосредственным измерением. В случае если емкость жил кабель-троса между собой (C_ϕ) и емкость жилы относительно брони (C_ϕ) близки по величине, то в выражении (7) будем считать $C_\phi / C_\phi = 1$, тогда

$$I_{\text{емк}} = 4 \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (8)$$

Если емкости C_ϕ и C_ϕ существенно отличаются по величине, в выражении (7) следует учесть реальное значение соотношения C_ϕ / C_ϕ :

$$I_{\text{емк}} = \left(2,96 \frac{C_\phi}{C_\phi} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (9)$$

Ток $I_{\text{емк}}$ потребляется собственной паразитной емкостью кабель-троса, которая равномерно распределяется вдоль всей его длины. Ток $I_{\text{емк}}$ имеет максимальное значение в начале кабель-троса, а затем линейно уменьшается до нуля в конце кабель-троса [20].

Активная составляющая тока нагрузки фазы A ($I_{\text{ан}}$) зависит от установленной нагрузки ТНПА. Этот ток может изменяться от нуля до максимального значения, определяемого пропускающей способностью жилы кабель-троса. Полный ток I_A фазы A находится как векторная сумма тока нагрузки $I_{\text{ан}}$ и емкостного тока $I_{\text{емк}}$ фазы A :

$$I_A = I_{\text{ан}} + j I_{\text{емк}}. \quad (10)$$

Подсчитаем величину тока по формуле (6) для параметров кабель-троса, указанных в таблице. После подстановки данных в формулу (6) получаем действующее значение тока:

$$I_{\text{емк}} = 2 \cdot 1000 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\cos 30}{241,3} + \frac{1000}{191,2} = 17,7 \text{ А}. \quad (11)$$

Определим амплитудное значение этого тока:

$$I_{\text{емк}} = 17,7 \cdot \sqrt{2} = 24,9 \text{ А}. \quad (12)$$

На рис. 4 приведены диаграммы сигналов, полученных при моделировании схемы, представленной на рис. 2, на холостом ходу.

Токи, протекающие через конденсаторы $C1$, $C4$ (I_{C1} , I_{C4}), и инверсный ток ($-I_{C3}$), протекающий через $C3$, представлены на верхней диаграмме. На нижней диаграмме представлен емкостный ток фазы A , рав-

ный сумме токов I_{C1} , ($-I_{C3}$) и I_{C4} согласно выражению (6). Амплитудное значение этого тока, найденное при моделировании, равно 24,8 А, полученное при расчете равно 24,9 А. Расхождение результатов объясняется в основном тем, что при расчете не учитывались сопротивление жилы кабель-троса и внутреннее сопротивление источника питания.

Рис. 4. Диаграммы токов в однофазной схеме кабель-троса

Расчетное значение этого тока на расстоянии l от начала кабель-троса можно определить по следующему выражению:

$$I(l) = I_{\text{нач}} (1 - l/L), \quad (13)$$

где $I_{\text{нач}}$ – фазный ток в начале кабель-троса; $I(l)$ – фазный ток в кабель-тросе на расстоянии l от начала; l – текущее расстояние от начала кабель-троса; L – длина кабель-троса.

Ток в начале кабель-троса $I_{\text{нач}}$, можно определить по выражению (6). График выражения (13) представлен на рис. 5.

Рис. 5. График для определения тока в произвольной точке кабель-троса

До сих пор исследовался реактивный ток емкостного характера, потребляемый кабель-тросом. Ток нагрузки I_n , потребляемый ТНПА, обозначен на рис. 3 вектором I_{An} . Сумма векторов I_{An} и $I_{Aемк}$ образует вектор фазного тока I_A , опережающего на угол φ вектор фазного напряжения V_A . Этим углом определяется значение коэффициента мощности, или $\cos \varphi$, с которым потребляется энергия от инвертора. При увеличении тока нагрузки I_{An} от нуля до максимального значения, определяемого пропускающей способностью жилы кабель-троса, $\cos \varphi$ возрастает также от нуля до максимального значения.

Ток нагрузки, потребляемый ТНПА, в данном исследовании полагается чисто активным. Вектор I_{An} совпадает по фазе с вектором фазного напряжения V_ϕ . Величина тока I_n зависит от заданной мощности нагрузки P_n , приходящейся на одну фазу, и от величины фазного напряжения V_ϕ :

$$I_n = \frac{P_n}{V_\phi}. \quad (14)$$

Полный ток I_A , потребляемый кабель-тросом по фазе A , определяется векторной суммой тока нагрузки I_n и емкостного тока $I_{Aемк}$:

$$I_A = I_n + jI_{Aемк}. \quad (15)$$

После подстановки в выражение (15) I_n из равенства (14), $I_{Aемк}$ из (8) получаем выражение для фазного тока I_A :

$$I_A = \frac{P_n}{V_\phi} + j4 \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет построить семейство характеристик $I_A = f(V_\phi)$ для ряда значений P_n .

Модуль фазного тока I_A , равный длине вектора I_A (см. рис. 3), определяется следующим выражением (17):

$$|I_A| = \sqrt{\left(\frac{P_n}{V_\phi}\right)^2 + \left(4 \frac{V_\phi}{X_\phi}\right)^2}. \quad (17)$$

В подкоренном выражении (17) первое слагаемое обратно пропорционально напряжению V_ϕ , второе слагаемое – прямо пропорционально ему. Сумма этих слагаемых имеет минимум при $V_\phi = V_{\phi опт}$:

$$V_{\phi опт} = \sqrt{P_n X_\phi / 4}. \quad (18)$$

При мощности на фазе 20 кВт, $X_\phi = 191,2$ Ом согласно формуле (18) $V_{\phi опт} = 978$ В. Подставим выражение (18) в (17), получим формулу для расчета минимальной величины фазного тока I_{Amin} , который потребляется по кабель-тросу при оптимальном фазном напряжении $V_{\phi опт}$ и передаваемой мощности P_n :

$$I_{Amin} = \sqrt{8P_n / X_\phi}. \quad (19)$$

При вышеуказанных параметрах (P_n , X_ϕ) согласно равенству (19) ток $I_{Amin} = 28,9$ А. Режим работы кабель-троса при $V_{\phi опт}$ является оптимальным, так как обеспечивает минимальный ток в жилах кабель-троса. Полную мощность S , потребляемую каждой фазой кабель-троса в этом режиме, можно определить как

$$S = V_{A опт} I_{Amin} = 2P_n. \quad (20)$$

Из данного выражения следует, что при работе кабель-троса в оптимальном электрическом режиме потребляемая им полная мощность S численно равна удвоенной мощности нагрузки.

Используя выражение (17), можно построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) $I_A = f(P_n, V_\phi)$ для ряда значений мощности P_n . На рис. 6 представлена ВАХ для мощности нагрузки на одну фазу $P_n = 20$ кВт.

Рис. 6. Вольт-амперная характеристика кабель-троса

Построенная ВАХ показывает, что при фазном напряжении 978 В потребляемый кабель-тросом ток при передаваемой мощности 20 кВт на фазу имеет наименьшее значение. Поэтому данный режим передачи электроэнергии можно считать оптимальным.

Обоснование выбора частоты

Величина частоты напряжения при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе, как отмечено ранее, также оказывает влияние на ряд важных параметров СЭП ТНПА. Увеличение частоты напряжения переменного тока ведет к уменьшению массы и габаритов подводной части СЭП по экспоненциальному закону. Габариты СЭП ТНПА в основном определяют намоточные элементы системы (входной трехфазный понижающий трансформатор составляет до 80% от общих габаритов и массы подводной части СЭП), и с увеличением частоты массогабаритные показатели трансформаторов и дросселей существенно улучшаются. Это связано с тем, что ЭДС E , наводимая в обмотках трансформатора, выражается формулой [21, 22]

$$E = 4k_\phi w f B_m S, \quad (21)$$

где k_ϕ – коэффициент формы напряжения; w – число витков обмотки; f – частота преобразования; B_m – амплитуда индукции; S – сечение сердечника.

Из выражения (21) следует, что с увеличением частоты преобразования f при неизменной величине ЭДС E необходимо уменьшать либо число витков w , либо индукцию B_m , либо сечение сердечника S . В любом случае это приводит к уменьшению массы и габаритов всего трансформатора. Однако учитывая, что потери в стали пропорциональны частоте в степени 1,3, а индукции – в квадрате, для исключения перегрева трансформатора приходится снижать индукцию с ростом частоты по закону

$$B \equiv 1/f^{0,65}. \quad (22)$$

В связи с этим масса трансформатора m с увеличением частоты f сначала снижается быстро, затем значительно медленнее до достижения оптимального значения частоты.

На рис. 7 представлена зависимость приведенной массы трансформатора $m_{\text{тр}}$ с сердечником типа ГМ54ДС из ленты магнитомягкого нанокристаллического сплава на основе железа толщиной 25 мкм и удельных магнитных потерь $P_{\text{уд.тр}}$ от частоты питающего напряжения f при номинальной мощности 20 кВт, которая получена экспериментально. Из рис. 7 следует, что оптимальное значение частоты $f_{\text{опт}}$ для данного трансформатора находится в диапазоне от 0,8 до 1,2 кГц, что обеспечивает высокие удельные характеристики при низких удельных магнитных потерях.

Рис. 7. Зависимость приведенной массы трансформатора и удельных магнитных потерь от частоты питающего напряжения

В современных СЭП ТНПА в качестве сердечников для силовых входных трансформаторов подводной части все чаще применяют магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов типа ГМ42ДС, ГМ54ДС и др. с высокой начальной магнитной проницаемостью, низкой остаточной магнитной индукцией и малыми удельными магнитными потерями [23, 24]. Высокие рабочие частоты магнитопроводов при низких удельных магнитных потерях обеспечивают высокие удельные характеристики трансформаторов и дросселей системы.

Увеличение частоты есть необходимое условие уменьшения массогабаритных показателей. Но с другой стороны, увеличение частоты имеет отрицательные последствия. С увеличением частоты растет паразитная емкостная составляющая тока кабель-троса, которую необходимо компенсировать дросселем, что в свою очередь увеличивает габариты бортовой и подводной частей СЭП ТНПА. К тому же у каждого кабель-троса есть максимально допустимые параметры проводимого тока и с ростом пропускной составляющей тока резко увеличивается масса кабель-троса, что недопустимо.

Выводы

Таким образом, существуют определенные значения частоты и напряжения для конкретной структуры СЭП ТНПА, при которых удельные магнитные потери, величина индуктивности дросселя, масса и габариты трансформаторов и кабель-троса находятся в балансе. Для рассмотренной СЭП ТНПА с кабель-тросом длиной до 6000 м и мощностью 60 кВт оптимальной величиной переменного фазного напряжения и частоты в кабель-тросе является $V_{\text{ф}} = 978$ В и $f = 1000$ Гц.

Предложенная методика дает возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения и частоты в кабель-тросе при передаче энергии по кабелю на переменном токе с учетом собственной емкости.

Литература

1. Подводные аппараты для геологических исследований / под ред. А.М. Игнатова. — Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. — 92 с.
2. Привязные подводные системы: Прикладные задачи статики и динамики / Н.И. Виноградов, М.Л. Гутман, И.Г. Лев, М.З. Нисневич. — СПб.: СПбГУ, 2000. — 313 с.
3. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. — М.: МОРКНИГА, 2012. — 506 с.
4. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098) / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017. — Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. — Vol. 177(1).
5. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018) / V.M. Rulevskiy, V.A. Chekh, Y.A. Shurygin, A.A. Pravikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6. — Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. — Vol. 327(2).
6. Bukreev V.G. Power supply system model of remote processing equipment / V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, V.M. Rulevskiy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2018. — Vol. 329(4). — P. 119–131.
7. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system / T. Hazel, H.N. Baerd, J.J. Legeay, J.J. Bremnes // IEEE Industry Applications Magazine. — 2013. — Vol. 19(5), No. 6553138. — P. 58–67.
8. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2004. — Т. 307, № 5. — С. 120–123.
9. Мишин В.Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2013. — Т. 322, № 4. — С. 107–110.
10. Мишин В.Н. Система электропитания универсального многоканального телеуправляемого необитаемого буксируемого комплекса / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.А. Тарасенко // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2014. — № 5. — С. 8–10.
11. Система электропитания глубоководного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного

тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 155–167.

12. Пат. 119905 РФ, МПК H01Q 1/34. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя (варианты) / В.Н. Мишин (РФ), В.А. Пчельников (РФ), В.М. Рулевский (РФ), А.Г. Юдинцев (РФ). – № 2 012 117 672 / 08; заявл. 27.04.12; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24. – 3 с.

13. Пат. 122530 РФ, МПК H02J 3/18. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе (варианты) / В.Н. Мишин (РФ), В.А. Пчельников (РФ), В.М. Рулевский (РФ), А.Г. Юдинцев (РФ). – № 2 012 124 602 / 07; заявл. 14.06.12; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33. – 2 с.

14. Кабели геофизические грузонесущие, кабели силовые, кабельные линии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pskovgeokabel.ru/products/0_8/ (дата обращения: 10.07.2019).

15. Пат. 87581 РФ, МПК H02J 3/18. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе / В.Н. Мишин (РФ), В.М. Рулевский (РФ), В.А. Пчельников (РФ), О.В. Бубнов (РФ). – № 2 008 142 707 / 22; заявл. 28.10.08; опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28 – 2 с.

16. Рулевский В.М. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с компенсацией реактивной мощности // Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии». – СПб., 2014. – № 2 (24). – С.14–17.

17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.

18. Ананичева С.С. Передача электроэнергии на дальние расстояния: учеб. пособие / С.С. Ананичева, П.И. Бартоломей, А.Л. Мызин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1993. – 80 с.

19. Ананичева С.С. Методы расчета параметров электрических сетей и систем: метод. пособие / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. – Екатеринбург, 2002. – 56 с.

20. Азаров В.С. Передача и распределение электроэнергии в примерах и решениях: учеб. пособие. – М.: МГОУ, 2005. – 213 с.

21. Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учеб. пособие / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 240 с.

22. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: учеб. пособие / В.П. Обрусник. – Томск, 2012. – 125 с.

23. Ферромагнитные материалы Гаммет PCI [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://gamma-met.ru/misc/table2_DS.xls (дата обращения: 08.06.2018).

24. Гаммет. Магнитные свойства кольцевых магнитопроводов из анизотропной электротехнической стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gamma-met.ru/ru/electro_d.htm (дата обращения: 08.06.2018).

Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, проректор по научной работе и инновациям Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Тел.: +7-906-950-04-01

Эл. почта: rulevsky@niiiaem.tomsk.ru

Rulevskiy V.M.

Method to determine the optimal voltage and AC frequency in a three-phase cable-rope of the underwater power supply system

The article presents a methodology that allows determining the optimal values of three-phase voltage and frequency in a cable-rope of a power supply system for a remote-controlled unmanned underwater vehicle in order to ensure a minimum current load taking into account the cable-rope's own capacity.

Keywords: remote-controlled unmanned underwater vehicle, power supply system, load, frequency, cable-rope, three-phase inverter, blind current.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127

References

1. *Podvodnye apparaty dlya geologicheskikh issledovaniy* [Underwater vehicles for geological applications]. Edited by A.M. Ignanov, Gelendzhik, Publishing office «Yuzhmorgeologia», 1990, 92 p.

2. Vinogradov N.I., Gutman M.L., Lev I.G., Nisnevich M.Z. *Privyaznye podvodnye sistemy: Prikladnye zadachy statiki i dinamiki* [Tethered underwater systems: Applied tasks in statistics and dynamics]. Saint Petersburg: SPBGU, 2000, 313 p.

3. Voitov D.V. *Teleupravliaemye neobitaemye podvodnye apparaty* [Remote-controlled unmanned underwater vehicles], Moscow: «MORKNIGA», 2012, 506 p.

4. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarova E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Yu.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017*. Tomsk, Institute of Physics Publishing, 2017, vol. 177 (1).

5. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Shurygin Yu.A., Pravikova A.A.. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6, 2018*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. vol. 327 (2).

6. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M.. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329 (4), pp. 119–131.

7. Hazel T., Baerd H.H., Legeay J.J., Bremnes J.J. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2013, vol. 19 (5), no. 6553138, pp. 58–67.

8. Rulevskiy V.M., Dementiev Yu.N., Bubnov O.V. *Sistemy elektropitaniya teleupravlyaemikh podvodnikh apparatov* [Power supply systems for remote-controlled underwater vehicles]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004. vol. 307, no. 5, pp. 120–123.

9. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Yudin A.G. *Sistemy elektropitaniya teleupravlyaemikh apodvodnikh apparatov peremennogo toka moshnosti svyshe 10kW* [Power supply systems for AC remote-controlled underwater vehicles with a power exceeding 10 kW]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. vol. 322, no. 4, pp. 107–110.

10. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Tarasenko A.A. *Sistema elektropitaniya universalnogo teleupravlyaemogo neobitaemogo buksiruemogo kompleksa* [Power supply system for

multi-purpose multi-channel remote-controlled unmanned towed complex]. *Electronics and electrical equipment of transport*, 2014, no. 5, pp. 8–10.

11. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Bukreev V.G., Meshcheryakov R.V. *Sistema elektropitaniya glubokovodnogo apparata s visokovoltnoy peredachei energii postoyannogo toka po kabel-trossu* [Power supply systems for deep-diving submersible with high-voltage DC transmission via cable-rope]. *Bulletin of the YuFU. Engineering Sciences*, 2018, no. 1 (195), pp. 155–167.

12. Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Yuditsev A.G. *Sistema elektrosnabzheniya podvodnogo teleupravlyаемого apparata s sudna-nositelya (varianty)* [Power supply system underwater vehicle controlled remotely from parent-vessel (options)]. Patent RF, no. 119905, 2012.

13. Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Yuditsev A.G. *Sistema elektrosnabzheniya podvodnogo teleupravlyаемого apparata s sudna-nositelya (varianty)* [Power supply system underwater vehicle controlled remotely from parent-vessel (options)]. Patent RF, no. 122530, 2012.

14. *Kabeli geofizicheskie gruzonesushchie, kabeli silovye, kabelnye linii* [Carrying geophysical cables, supply cables, cable lines]. Electronic resource: http://pskovgeo-kabel.ru/products/0_8/ (Accessed: July 10, 2019).

15. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V. *Ustroystvo dlya elektrosnabzheniya podvodnogo apparata s sudna-nositelya s kompensatsiyey reaktivnoi moshchnosti v kabele-trosse* [Device allowing power supply of underwater vehicle from parent-vessel with reactive power compensation in cable-rope]. Patent RF, no. 87581, 2008.

16. Rulevskiy V.M. *Sistema elektropitaniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo kompleksa s kompensatsiyey reaktivnoimoshchnosti* [Power supply system for remote-controlled unmanned underwater complex with reactive power compensation]. *Research journal «MORINTECH»*, Saint-Petersburg, 2014, no. 2 (24), pp. 14–17.

17. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. Moscow, OJSC «Vysshaya Shkola Publishers», 1973, 752 p.

18. Ananicheva S.S., Bartolomei P.I., Myzin A.L. *Peredacha elektroenergii na dalnye rasstoyaniya: Uchebnoe posobie*. [Long distance energy transmission: Learning Guide]. Yekaterinburg: UGTU-UPI, 1993, 80 p.

19. Ananicheva S.S., Myzin A.L. *Metody rascheta parametrov elektricheskikh setei i sistem: Metodicheskoe posobie* [Methods to calculate parameters for electric circuits and systems: Learning Guide]. Yekaterinbourg, 2002, 56 p.

20. Azarov V.S. *Peredacha i raspredelenie elektroenergii v primerakh i resheniyakh: Uchebnoe posobie* [Energy transmission and distribution in examples and solutions: Learning Guide]. Moscow: MGOU, 2005, 213 p.

21. Petrovich V.P., Voroshina N.A., Glazachev A.V. *Silovye preobrazovateli elektricheskoi energii: uchebnoe posobie* [Power converters for electrical energy: Learning Guide]. Tomsk: Publishing office of Tomsk Polytechnic University, 2009, 240 p.

22. Obrusnik V.P. *Magnitnye elementy elektronikh ustroystv: uchebnoe posobie* [Magnetic components for electronic devices: Learning Guide]. Tomsk, 2012, 125 p.

23. *Ferromagnitnye materialy Gammamet PCI* [Ferromagnetic materials Gammamet PCI]. Electronic resource: http://gammamet.ru/misc/table2_DS.xls (Accessed: June 08, 2018).

24. *Gammamet. Magnitnye svoystva koltsevykh magnitoprovodov iz anizotropnoi elektrotekhnicheskoi stali* [Gammamet. Magnetic properties of ring-type magnetic circuits made from anisotropic electrical steel]. Electronic resource: http://gammamet.ru/ru/electro_d.htm (Accessed: June 08, 2018).

Victor M. Rulevskiy

Candidate of Engineering, Vice-Rector for Research and Innovation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Phone: +7-906-950-04-01
Email: rulevsky@niiam.tomsk.ru